

05

## **Эффект аккумуляции упругой энергии и возможность управления процессом разрушения в сложных структурах**

© С.Г. Псахье, А.Ю. Смолин, Е.М. Татаринцев, Е.А. Шваб

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
Томский государственный университет

Поступило в Редакцию 29 июля 1999 г.

На основе компьютерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов исследовано поведение и особенности разрушения сложных структур при динамическом нагружении. Показана возможность эффекта аккумуляции упругой энергии, а также возможность существенного изменения характера разрушения в результате незначительных геометрических изменений исходной структуры.

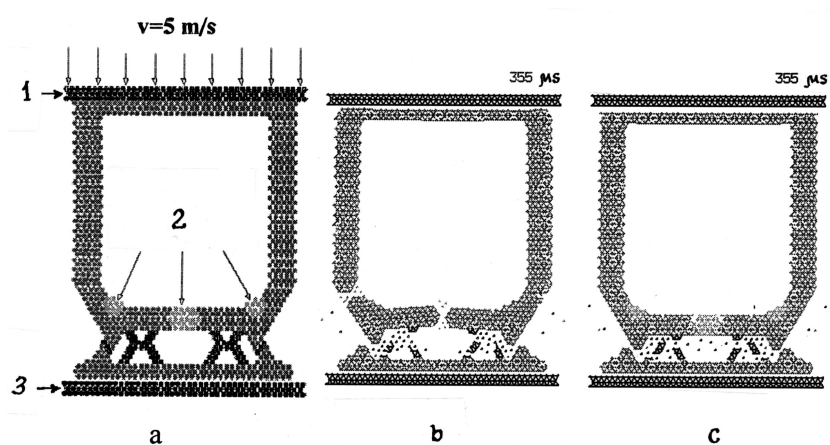
Одной из основных проблем современной техники является повышение живучести конструкций при их динамическом нагружении. Хорошо известным примером подобного класса задач является повышение безопасности автомобилей и других транспортных средств при столкновениях. В общем случае решение состоит в управлении переходом кинетической энергии взаимодействия (соударения) в энергию разрушения наименее важных частей и деталей конструкции. Следует отметить, что аналогичная проблема стоит и в материаловедении, так как большинство современных конструкционных материалов являются гетерогенными и имеют сложную внутреннюю структуру. При оптимизации этой структуры для работы материалов в условиях динамических нагрузок необходимо учитывать, каким образом перераспределение упругой энергии, связанное, например, с фазовыми переходами, генерацией и накоплением микрповреждений и т. д., влияет на изменение прочностных свойств материалов в процессе нагружения [1–4]. Поскольку реальные эксперименты по разрушению сложных объектов являются достаточно дорогостоящими, а получение детальной информации часто сопряжено с существенными трудностями, то в решении подобных проблем все большее значение приобретают методы компьютерного моделирования.

Как правило, при этом используются методы континуальной механики. Хотя на основе данных методов были получены существенные достижения в данной области, континуальный подход имеет определенные ограничения, прежде всего связанные с возможностью описания генерации повреждений, формирования и распространения трещин. Задачи этого класса могут быть решены на основе развиваемого в последние годы метода подвижных клеточных автоматов, который успешно применялся для моделирования разрушения различных материалов и структур [4–8].

В данной работе рассматривалась задача о возможности управления "закачиваемой" упругой энергией при динамическом нагружении сложных структур. Для корректного решения данной задачи важным является детальное знание поведения системы начиная с возникновения первых повреждений и вплоть до полного разрушения моделируемой структуры. В связи с этим в качестве метода моделирования был выбран указанный выше метод подвижных клеточных автоматов.

В рамках данного метода моделируемый материал представляется как ансамбль элементов (клеточных автоматов), взаимодействующих между собой по определенным правилам. В отличие от классического метода клеточных автоматов [9,10] эти элементы могут перемещаться в пространстве под действием сил межавтоматного взаимодействия и внешних сил. При этом рассматривается как трансляционное, так и ротационное движение. В качестве меры механического взаимодействия рассматривается межавтоматное перекрытие и относительный разворот [8]. Более того, каждая пара элементов также рассматривается как бистабильный автомат и характеризуется состоянием связанности или несвязанности (переход от одного состояния к другому есть элементарный акт разрушения). Уравнения движения для подвижных клеточных автоматов получены в рамках модели Виннера–Розенблюта и представляют собой вариант уравнений Ньютона для ансамбля частиц с учетом многочастичного взаимодействия [8].

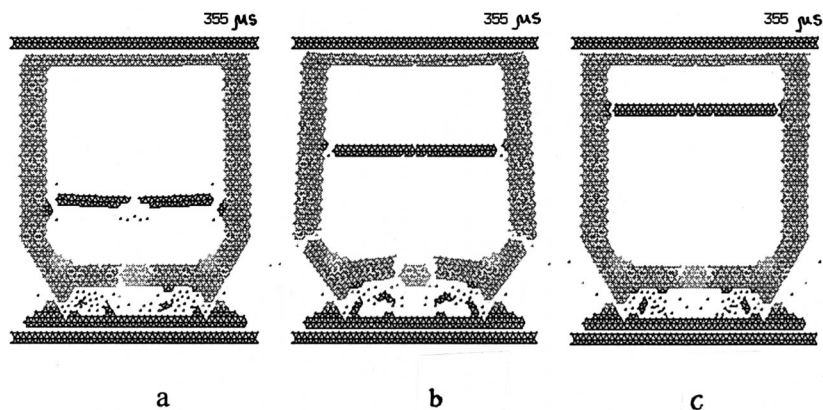
Благодаря мобильности отдельных элементов, такой подход позволяет моделировать различные процессы, имеющие место в реальном материале под нагрузкой, включая эффекты проникания и перемешивание масс, генерацию и развитие повреждений, образование трещин. Путем задания специальных условий на границах [5,8] можно имитировать различные режимы механического нагружения (сжатие, растяжение, сдвиговая деформация и др.).



**Рис. 1.** Картины разрушения моделируемых конструкций в момент времени  $355 \mu\text{s}$ : *a* — рама без включений (базовая), *b* — рама с включениями; 1 — поршень, 2 — демпфирующие включения, 3 — преграда.

В данной работе нагружению подвергались плоские образцы, представляющие собой структуру, подобную передней части рамы автомобиля. Механические характеристики материала соответствовали керамике  $\text{ZrO}_2$ , для которой параметры подвижных клеточных автоматов достаточно хорошо определены [4,8]. Ширина моделируемого образца составляла 4 см, высота — 5, размер автомата — 0.1 см. Форма структуры и схема нагружения представлены на рис. 1, *a*. Нагружение осуществлялось путем движения "поршня" со скоростью 5 м/с, при этом передняя сторона структуры налетала на неподвижную преграду. Параметры автоматов преграды соответствовали механическим характеристикам бетона.

Проведенные численные эксперименты по "столкновению" показали, что центр и углы у передней стенки моделируемой структуры подвержены максимальным локальным смещениям. Поэтому с целью более равномерного распределения закачанной упругой энергии в этих областях были введены демпфирующие включения из материала, имеющего в 2 раза меньшие модули упругости, чем у материала базовой структуры. На рис. 1, *a* и *b* показаны межавтоматные связи для базового образца

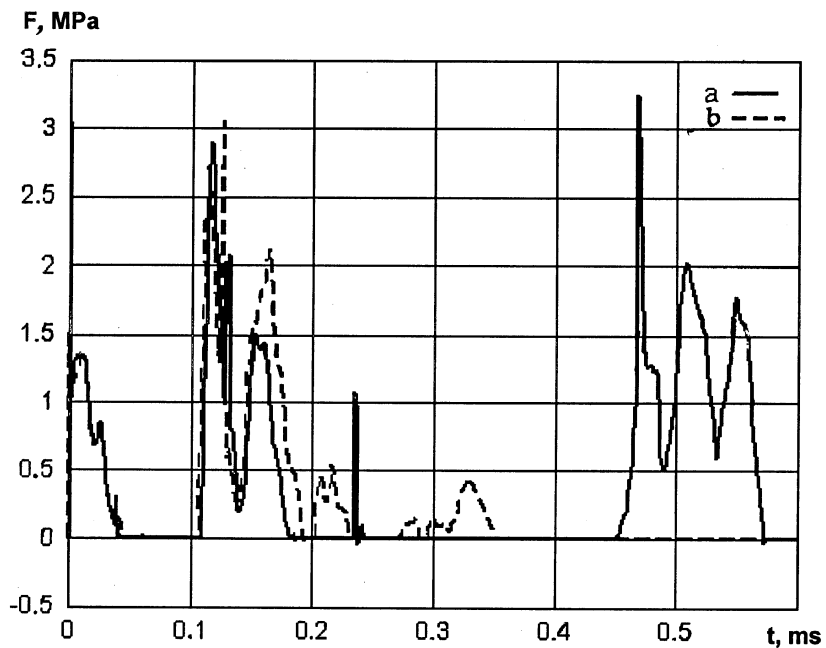


**Рис. 2.** Картины разрушения конструкций с горизонтальными перемычками в момент времени  $355 \mu\text{s}$ .

(рис. 1, *a*) и образца с включениями (рис. 1, *b*) к моменту времени  $355 \mu\text{s}$ . Из полученных результатов можно видеть, что, когда структура без включений теряет свою несущую способность, структура с включениями имеет лишь незначительные повреждения.

Анализ результатов моделирования показал, что в процессе нагружения наличие дополнительных включений приводит к динамической "аккумуляции" механической энергии столкновения. Этот эффект объясняется тем, что, как уже упоминалось, области включений в процессе нагружения подвержены наибольшим смещениям, а в силу своей большей податливости включения не ломаются, а передают импульсы нагрузки дальше по образцу. Это приводит к размытию концентраторов напряжений и сохранению целостности структуры. В свою очередь, это ведет к существенному повышению порогового значения закачанной энергии, т.е. энергии, поглощаемой структурой до потери ею несущей способности. Фактически упругая энергия "циркулирует" внутри структуры до тех пор, пока не сформируется концентратор напряжений, мощность которого будет достаточна для формирования макротрещины.

С целью исследования возможности управления пороговым значением закачанной энергии путем изменения геометрии конструкции во внутреннюю часть рамы вводили тонкую перемычку. Расположение



**Рис. 3.** Зависимость силы реакции, действующей на "поршень", от времени для разных вариантов расположения внутренней перемычки. Обозначения кривых соответствуют рис. 2.

данной перемычки варьировалось (рис. 2). Необходимо отметить, что перемычка независимо от своего расположения разрушается уже к моменту времени  $120 \mu\text{s}$ . Однако при этом в каждой из рассмотренных структур происходит характерное, свойственное только данной структуре перераспределение потоков упругой энергии. В частности, наличие перемычки приводит к возникновению специфического "контура", внутри которого происходит циркуляция упругой энергии. В результате высвобождения этой энергии при разрушении перемычки каждый образец имеет свою собственную динамику формирования и развития концентраторов напряжений, а следовательно свою историю разрушения.

С этой точки зрения очевидно, что отклик сложных структур при динамическом нагружении (рис. 3), а также пороговое значение закачанной энергии определяются не только общей геометрией конструкции. Так, например, перенос перемишки в середину или ближе к передней части рамы существенно снижает пороговое значение закачанной энергии и изменяет картину разрушения в целом.

Таким образом, полученные результаты явно демонстрируют возможность управления процессом разрушения и повышения живучести конструкций как изменением их геометрии, так и путем введения специфических включений.

## Список литературы

- [1] Панин В.Е. // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 5–22.
- [2] Haug E., Clinckemaillie J., Ni X., Pickett A.K., Queckbarner T. // International Crashworthiness and Design Symposium ICD '95. University of Valenciennes, May 3–4, 1995.
- [3] Lonsdale G., Clinckemaillie J., Vlachoutsis S., Dubois J. // Lecture Notes in Computer Science 796. Springer-Verlag, 1994. P. 55–61.
- [4] Псахье С.Г., Моисеенко Д.Д., Дмитриев А.И., Шилько Е.В., Коростелев С.Ю., Смолин А.Ю., Дерюгин Е.Е., Кульков С.Н. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 4. С. 71–76.
- [5] Псахье С.Г., Хори Я., Коростелев С.Ю., Смолин А.Ю., Дмитриев А.И., Шилько Е.В., Алексеев С.В. // Изв. вузов. Физика. 1995. Т. 38. № 11. С. 58–69.
- [6] Псахье С.Г., Шилько Е.В., Дмитриев А.И., Коростелев С.Ю., Смолин А.Ю., Коростелева Е.Н. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 12. С. 69–74.
- [7] Psakhie S.G., Smolin A.Yu., Shilko E.V., Korostelev S.Yu., Dmitriev A.I., Alekseev S.V. // Journal of Materials Science & Technology. 1997. V. 13. № 11. P. 69–72.
- [8] Псахье С.Г., Коростелев С.Ю., Смолин А.Ю., Дмитриев А.И., Шилько Е.В., Моисеенко Д.Д., Татаринцев Е.М., Алексеев С.В. // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 95–108.
- [9] Wolfram S. // Reviews of Modern Physics. 1983. V. 55. P. 601–620.
- [10] Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. М.: Наука, 1990. 272 с.